

# クリアファイルで作成した翼の揚力係数とフラップの効果

梅津瞳子\*・小林宏充\*\*,\*\*\*

## Lift Coefficient of an Airfoil Made of a Plastic Folder and the Effect of Flaps

Toko UMETSU, Hiromichi KOBAYASHI

Summary — We experimentally investigate the lift coefficient of a Gottingen 611 (GOE611) airfoil made of a plastic folder, varying the attack angle. The airfoil is a type of two-dimensional wings characterized by a flat bottom surface and a rounded top surface. We used a hair dryer instead of a wind tunnel. Consequently, the lift coefficient was underestimated by a factor of nine compared with the reference data of GOE611. This seems to be due to the difference between a projected wing area and a wing area exposed to the dryer's wind. Adding a flap behind the airfoil increases the lift. We found the optimal distance between the airfoil and the flap to maximize the lift.

### 1. はじめに

飛行機が揚力によって飛ぶことは広く知られているが、翼の角度やその周囲の環境を変えるだけでその揚力が大きく変化することは興味深いことである。特に離着陸時に揚力を調整する装置として使用されるフラップの効果は、その配置によって変化すると予想できるが、フラップと翼との間の間隔によって揚力がどのように変化するかを直感的に判断するのは困難である。

本実験では、翼の模型に働く揚力を測定し、翼の角度やフラップの間隔を変化させた際の揚力の変化を明らかにすることを目的とする。本実験で得た揚力と風洞実験で得られている揚力係数の参照値との比較を通して、翼の迎角（翼と空気の流れがつくる角度）が揚力係数に与える影響を検討する。また、フラップと翼との距離が揚力に与える影響を定量的に把握する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 実験道具

実験道具として用いたものは、図1と以下に示す通りである。

- ・ テージー カラーホルダー A4 (CC-141A-17) : 図1 (a)

---

\* 慶應義塾大学法学部政治学科3年

\*\* 慶應義塾大学日吉物理学教室 (〒223-8521 横浜市港北区日吉4-1-1) : Dept. of Physics, Keio Univ. 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8521, Japan

\*\*\* 慶應義塾大学自然科学研究教育センター (〒223-8521 横浜市港北区日吉4-1-1) : Research and Education Center for Natural Sciences, Keio Univ. 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8521, Japan

- ・日本スリービー・サイエンティフィック株式会社 高精度バネばかり 0.2N (U20031) : 図 1 (b)
- ・(株)まるき フレックスストロークリア(直径 6 mm×200mm) : 図 1 (c)
- ・大宅産業株式会社 バーベキュー串 28cm×40 本入り(K-391) : 図 1 (d)
- ・Panasonic マイナスイオン ウインドプレス イオニティ(EH5403) : 図 1 (e)
- ・ナイロン製釣り糸 6号: 図 1 (f)

本論文では、図 1 (a)のカラーホルダーをクリアファイルと呼ぶこととする。



図 1 実験道具

## 2.2 翼の作成方法

図 2 に翼の作成方法を示す。図 2(a)のように、クリアファイルの閉じている側から縦 13cm 横 15cm の長方形を切り取る。図 2(b)のように、切り取ったクリアファイルの両面に穴あけパンチで穴を開ける。この時クリアファイルの閉じている側から下面の穴までの距離は、穴あけパンチの真ん中の印からパンチまでの距離である 4cm に固定する。一方で上面の穴については 1mm ずつ閉じている側へ距離を縮めることで翼の迎角を増加させる。なお、クリアファイルの横端から穴までの距離は 1 cm である。

図2(c)のように、穴あけパンチで開けた穴にストローを刺し、クリアファイルの開いている方を糊付けし、下面が平らで上面が凸型の翼の形になるように整える<sup>1)</sup>。バネばかりと接続するために、下面の2つのパンチ穴の中央にキリで穴を開け、適当な長さの釣り糸を通して固定する。

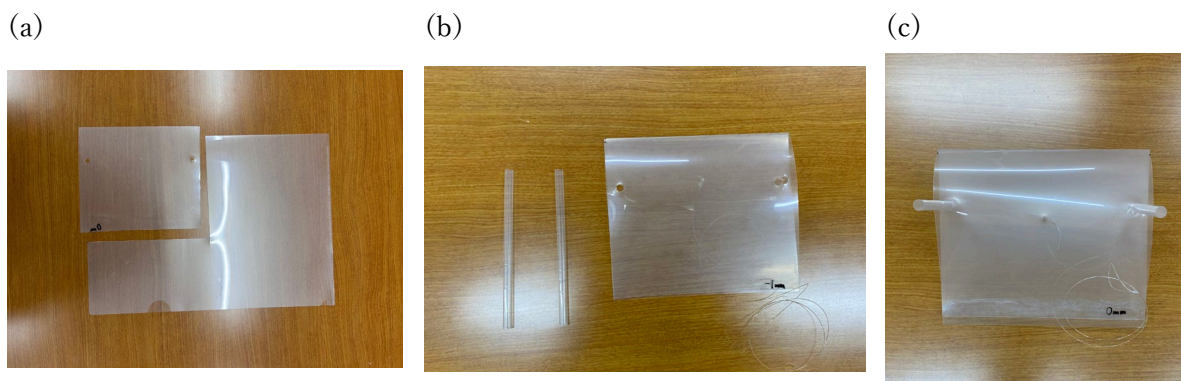
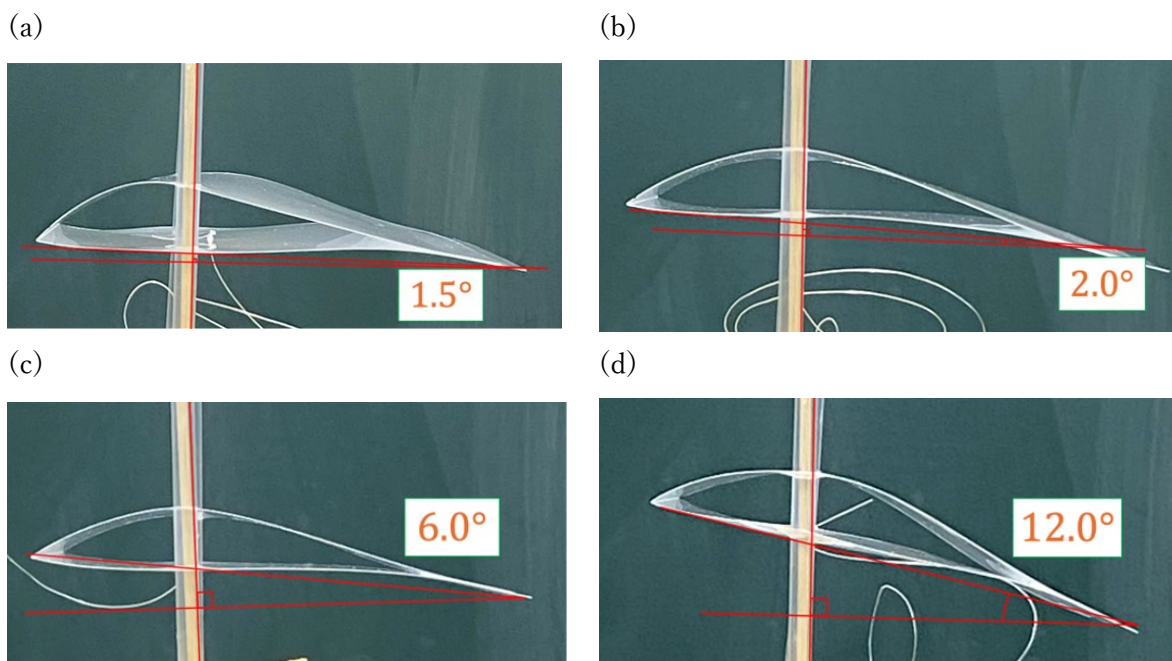


図2 翼の作成方法

### 2.3 翼の迎角

作成した翼の迎角を図3に示す。図3(a)~(e)は図1(b)でクリアファイル上面の穴の開ける位置を0mm、2mm、3mm、4mm、5mmとずらしたものである。竹串が垂直に刺さっていると仮定した時に、翼の下面の角度は水平に対してそれぞれ $1.5^\circ$ 、 $2.0^\circ$ 、 $6.0^\circ$ 、 $12.0^\circ$ 、 $15.0^\circ$ である。これらを翼に対する迎角とした。



(e)

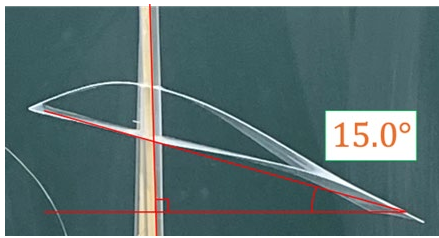
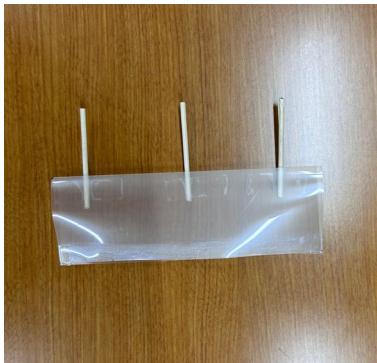


図3 翼の迎角

## 2.4 フラップ

翼の後方に取り付けるフラップを図4(a)に示す。フラップはクリアファイルを縦5cm、横15cmに切り取り、翼と同様に下面が平らで上面が凸型になるよう形を整えたものである（断面は図3と同様）。クリアファイルの閉じている側（図3では左側に相当）に竹串3本をテープでつけ、図4(b)のように翼の後方に取り付ける。

(a)



(b)



図4 フラップ

## 2.5 実験装置

実験装置の外観を図5に示す。揚力を測定するために前に示した図3のように、固定された竹串に翼のストローを刺し、翼が上下に可動するようにする。翼の下面から釣り糸を出し、滑車を通してバネばかりに繋ぐ。ドライヤーで翼の正面から風を送ることで翼は上向きに揚力を得る。結果としてバネばかりが押し下げられ、揚力が測定される。

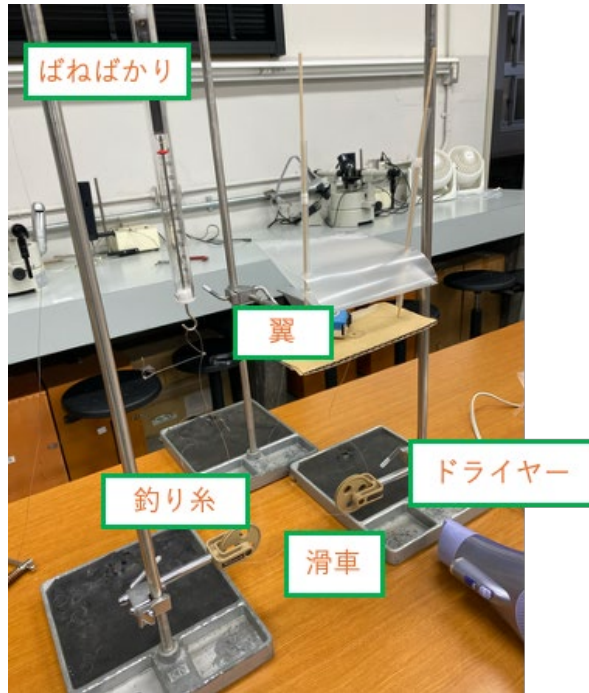


図5 実験装置外観

図6に実験装置の設定を示す。地面から滑車の中心までの高さは10cm、滑車の中心間の距離は15cm、地面から翼を設置するダンボール製の台までの高さは30cmとした。

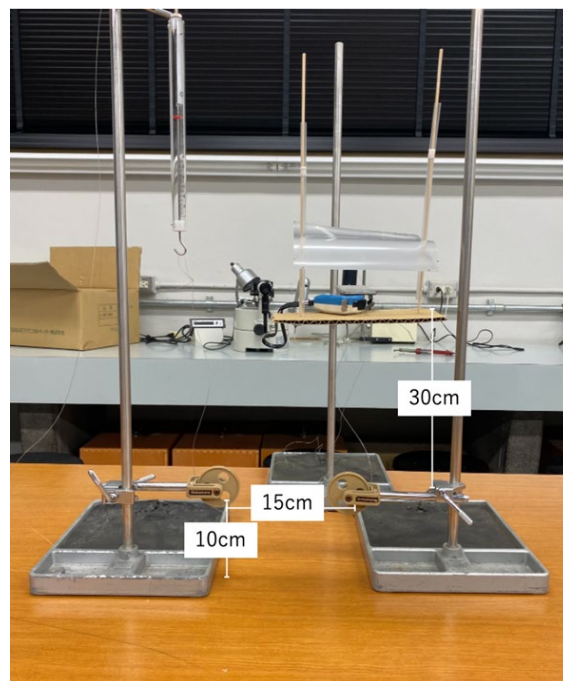


図6 実験装置の設定

## 2.6 測定方法

### (1) 翼の迎角と揚力の関係

ドライヤーを使って翼の正面から風を当て、押し下げられたバネばかりの値を測定する。図3(a)~(e)それぞれの翼の模型について実験する。

### (2) フラップと翼の間の距離と揚力の関係

翼の後ろにフラップをつけて、(1)と同様に揚力を測定する。翼とフラップの距離は、4mm、5mm、7mm、9mm、10mm、11mmと変化させる。なお、翼の迎角については条件を変えず、全て図3(b)の角度が2°の翼を用いる。

## 3. 実験結果

### 3.1 翼の迎角と揚力の関係

表1に、翼上面の穴のずらした幅に対する迎角、揚力、揚力係数の関係を示す。図7に、表1の迎角と揚力の関係を示す。迎角が増加すると揚力が上昇するが、その変化は迎角が増加するにつれて緩やかになった。

表1 翼上面の穴のずらした幅に対する迎角、揚力、揚力係数の関係

ずらした幅 [mm]	0	2	3	4	5
迎角 [度]	1.5	2.0	6.0	12.0	15.0
揚力 [N]	0.110	0.141	0.210	0.230	0.243
揚力係数	0.0757	0.0972	0.145	0.158	0.167

つれて緩やかになった。

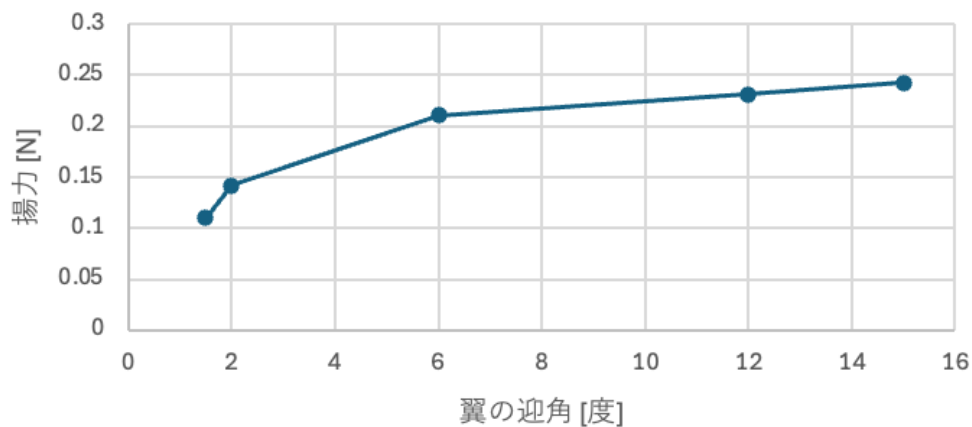


図7 翼の迎角と揚力

揚力係数 $C_L$ は揚力 $F$ と動圧（流速が持つ運動エネルギーが圧力として表されたもの）に起因する力から、下記のように定義される<sup>2)</sup>。 $\rho$ は密度、 $U$ は風速、 $S$ は翼上面の投影面積を表す。

$$C_L = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho U^2 S}$$

揚力  $F$  は、バネばかりで計測された値に、それぞれの迎角の翼（クリアファイルとストローと糸）の質量に重力加速度  $9.8\text{m/s}^2$  を乗じた重力を加算したものとした。

表 1 の迎角と揚力係数の関係を示したものが図 8 である。ここで、空気の密度  $\rho$  は  $20^\circ\text{C}$  の時の  $1.166\text{kg/m}^3$ 、ドライヤーの風速  $U$  は  $20\text{m/s}$ 、投影面積  $S$  は  $62.4\text{cm}^2$  を使用した。ドライヤーの風速は、ハンディータイプの熱線風速計で計測した平均値とした。なお、投影面積  $S$  はドライヤーの風が通る部分の面積である図 9(a) の紫色の部分に該当し、その面積は図 9(b) に示すように、ドライヤーの吹き出し口の幅  $4.8\text{cm}$  と翼の代表長さ  $13\text{cm}$  の積とした。その結果、揚力係数はおよそ  $0.07$  から  $0.17$  の値になった。

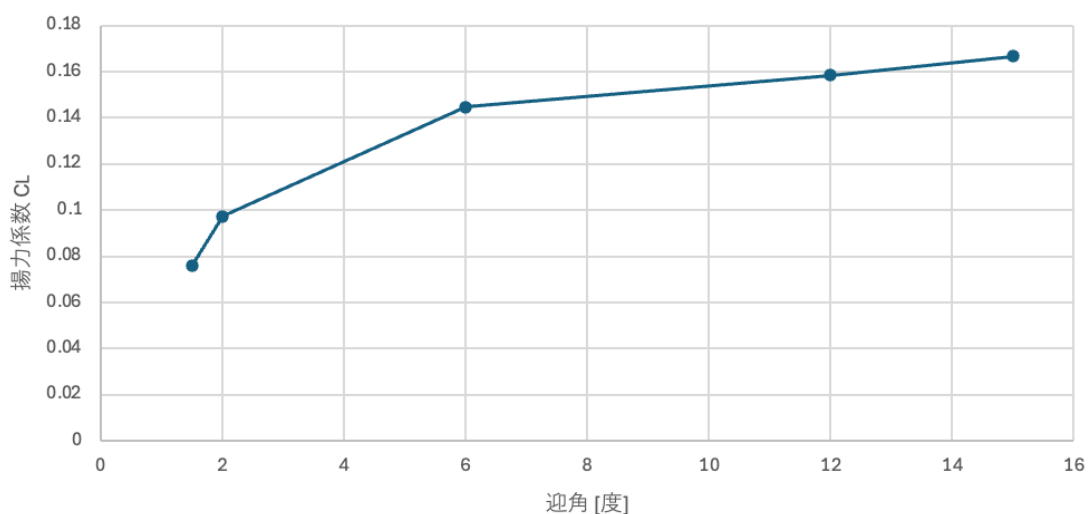


図 8 揚力係数

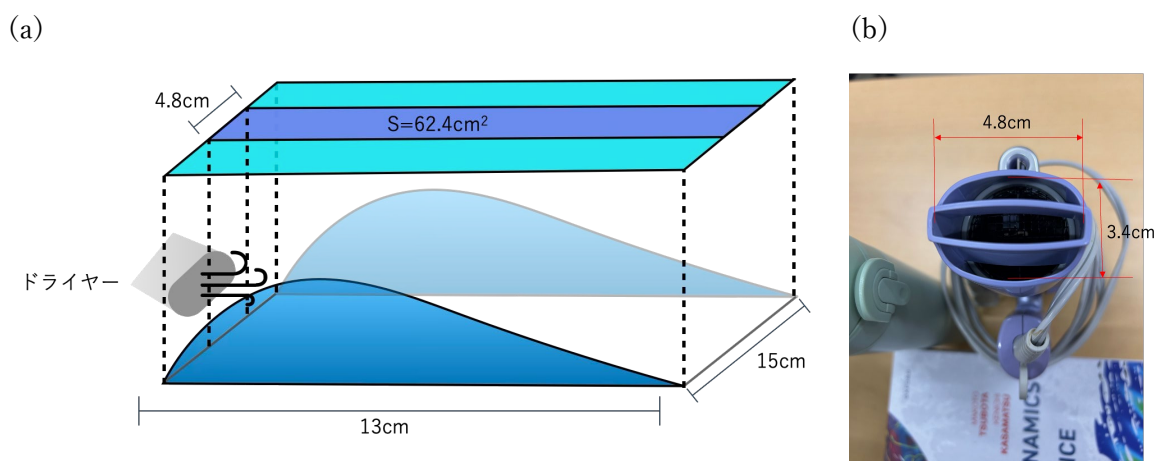


図 9 (a) 投影面積  $S$  と (b) ドライヤーの吹き出し口

表 2 に翼とフラップの間の距離と揚力の関係を示す。また、図 10 にその関係を図示する。揚力は  $0.16\sim 0.19\text{N}$  の間であり、距離が  $4\sim 9\text{mm}$  の間は揚力が増加し、 $9\sim 11\text{mm}$  の間では減少した。この実験では、距離が  $9\text{mm}$  の時に揚力が最大となった。

表2 翼とフラップの間の距離と揚力の関係

距離 [mm]	4	5	7	9	10	11
揚力 [N]	0.163	0.1753	0.187	0.189	0.169	0.157

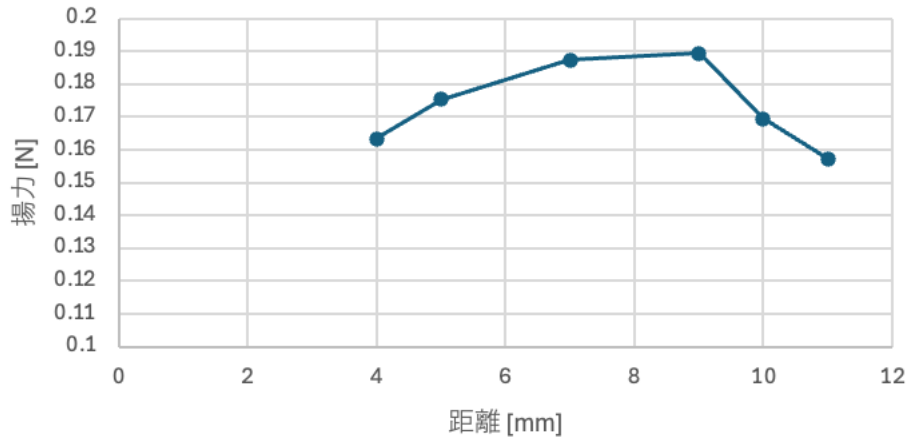


図10 フラップの距離と揚力

#### 4. 考察

図7、図8に示したように、迎角を上昇させるにつれて揚力と揚力係数が増加するという点で揚力理論と一致した。本実験で用いた翼は、下面が平らで上面が凸型の2次元翼である Gottingen 611 翼 (GOE611)<sup>3)</sup>を模擬した。図11にGOE611翼の断面を示す。図12にレイノルズ数が100,000と200,000におけるGOE611翼の揚力係数の参照値を示す。レイノルズ数は以下のように定義される。

$$Re = \frac{vL}{\nu}$$

ドライヤーの風速 $v$ は20m/s、翼の代表長さ $L$ は13cmを使用した。また、空気の動粘性係数 $\nu$ は10°Cの時に $1.4207 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、20°Cの時に $1.5111 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ である。よって本実験の翼周りにおけるレイノルズ数は172,060~183,008の間であると計算される。すなわち、本実験結果は、図12の $Re=100,000$ と200,000の間にあると考えられる。

そこで、図12に本実験結果 Exp を重ねて描画した。実験から得た揚力係数は参照値よりも全体的に低い値を示し、その差は約9倍であった。実験から得た揚力係数が参照値と比較すると9分の1だったことについて、以下のように考察する。

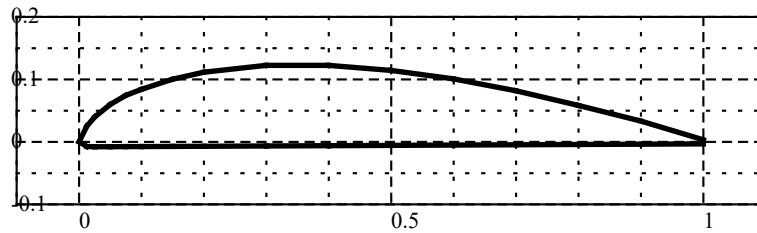


図 11 翼の断面

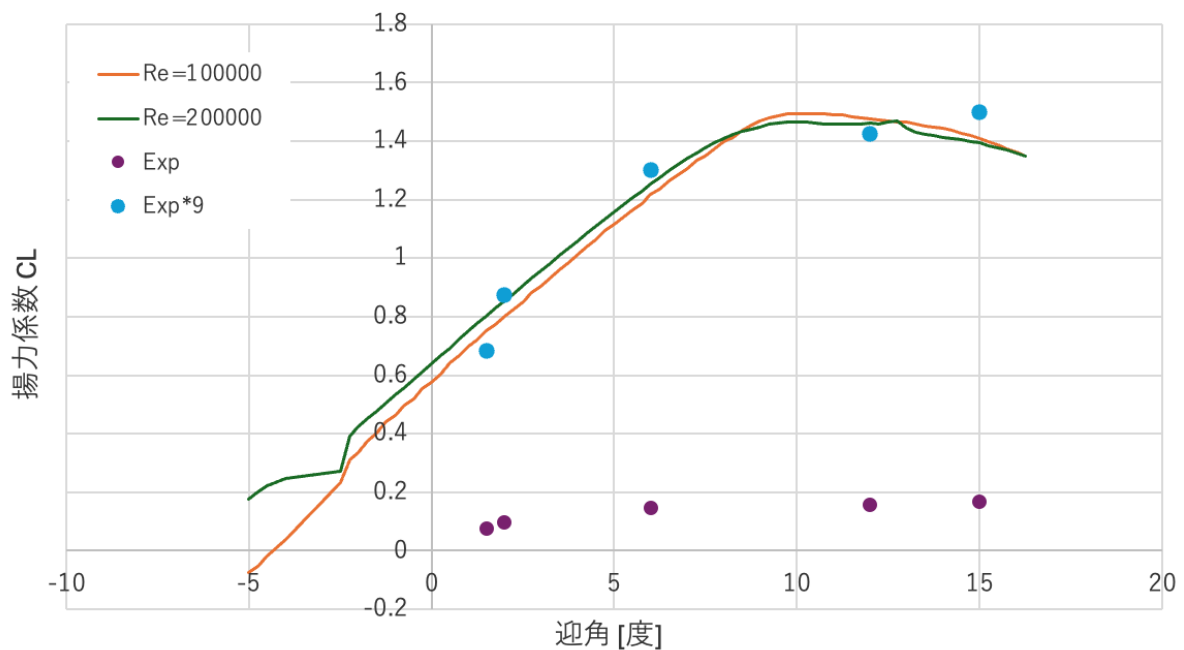


図 12 揚力係数の比較

まず、ドライヤーの風が翼の後方まで十分に達していなかったことで、投影面積  $S$  が想定より小さくなっていた可能性がある。また、ドライヤーの風速  $v$  は吹き出し口で測定した値であるため、実際に翼の上を通過する際は 10% 程度風速が減少していたことも考えられる。さらに、ドライヤーから出た噴流は中心速度が速くなるような速度分布を持つことが考えられ、噴流中心で計測した速度より面内の平均速度は低下している可能性がある。加えて、翼の模型に用いたクリアファイルの表面が粗く、剥離（翼表面から流れが剥がれる現象）が早まったことで風がクリアファイルの上面と接する投影面積が小さくなり、揚力が小さくなったことも考えられる。また、ストローと竹串の間の摩擦を無視したため、測定した揚力が実際より小さくなったとも考えられる。これらを総合的に考慮すると、実験で得た揚力係数が 9 倍近く過小評価された可能性も十分にあると言える。

フラップを取り付けなかった場合に翼に生じる揚力は、表 1 の通り 0.141N であったのに対して、フラップをつけると最大で 0.190N の揚力が得られたことからその効果を確認することがで

きた。また、フラップの距離と揚力の大きさの変化が単峰型のグラフを示したため、揚力を生む効果が最大となる距離が存在することが明らかになった。一般に、フラップは離着陸時などの低速時に、投影面積を増大させて揚力を増加させるために利用される。密着時から距離を増加させていくと、しばらくの間はその隙間に後流が入り込むことなく流れるので、結果として投影面積は増加していくと考えられる。一方で、ある程度以上の隙間が空いてしまうと、その隙間に翼後流の風が流れ込む割合が増加し、フラップによる投影面積の増大化の効果が低下すると考えられる。

他方で、翼の下面を通った風が、フラップとの隙間を通りフラップの上面に流れることで、流線曲率の定理から、コアンダ効果により揚力が増大するという説明もある<sup>4)</sup>。この考えでは、間隔が増大すると流線曲率が小さくなるので、揚力が低下すると説明される。最大揚力までの振る舞いは、隙間に下から上に流れ込む気流の割合が増大することで、揚力の割合が増加すると説明できる。

翼の迎角による後流の状況にもよるが、フラップと翼の間にはどちら向きの流れができていくか、フラップと翼の間の距離によって、複雑な流れ場が形成されていると予想され、興味深い。数値シミュレーションによって、後流がフラップへ及ぼす影響を可視化すると、より詳細な議論できると考えられるが、それは今後の課題としたい。

## 5. まとめ

本実験では、クリアファイルで作成した翼にヘアドライヤーによる風を送る簡易的な実験によって、翼の模型に働く揚力を測定した。その結果、翼の迎角を水平から増加させるにつれて、揚力は最初急激に増加するが、だんだん緩やかな増加に転じることがわかった。模擬した参照翼の揚力係数と比較したところ、9倍ほど小さな値となったが、その曲線の定性的な傾向はよく一致した。また、翼とフラップの間の距離を変化させて揚力を測定したところ、揚力を最大化する最適な距離が存在することが明らかになった。

## 謝辞

慶應義塾大学理工学部機械工学科の深瀬康二教授には、ご多忙中にもかかわらず、ハンディータイプの熱線風速計にてヘアドライヤーの風速を計測いただき、深く感謝いたします。バネばかり及びクリアファイルは、2025年度日吉教育活動等支援予算の法学部予算にて購入した。ここに感謝を申し上げます。

## 参考文献

- 1) FDA-フジドリームエアラインズ. “[航空教室]ひこうきが飛ぶ仕組みを解説！揚力実験装置の作り方”. 2022. [https://www.youtube.com/watch?v=\\_jphtW5hrqU](https://www.youtube.com/watch?v=_jphtW5hrqU), (参照 2026-1-8)
- 2) 飯田明由『基礎から学ぶ 流体力学』, オーム社, 2007年9月, 211-212

- 3) AirfoilTools.com: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=goe611-il>, (参照 2026-1-8)
- 4) 小峯龍男 『「流体力学」のキホン』, SB クリエイティブ, 2011年6月, 134-135